Bootstrapping

Bootstrapping is een techniek waarbij u een deel van de uitgangsspanning van een schakeling terugkoppelt naar de ingang met als doel de ingangsimpedantie of het uitsturingsbereik te vergroten. Wij geven u een aantal voorbeelden van deze techniek en bespreken de voordelen ervan.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 23-09-2019

Het begrip bootstrapping

Etymologie van het woord 'bootstrapping'
Het woord *'bootstrap'* is samengesteld uit de Engelse woorden *'boot'* en *'strap'*, te vertalen als *'de lus aan een laars'*. Er wordt beweerd dat de technische betekenis van dit woord terug te voeren is op de verhalen van Baron van Münchhausen, die zichzelf uit het moeras trok aan de riempjes van zijn laarzen. De term bootstrap wordt in de elektronica gebruikt voor situaties waarin een verschijnsel *'zich aan zijn eigen schoenveters optilt'*.

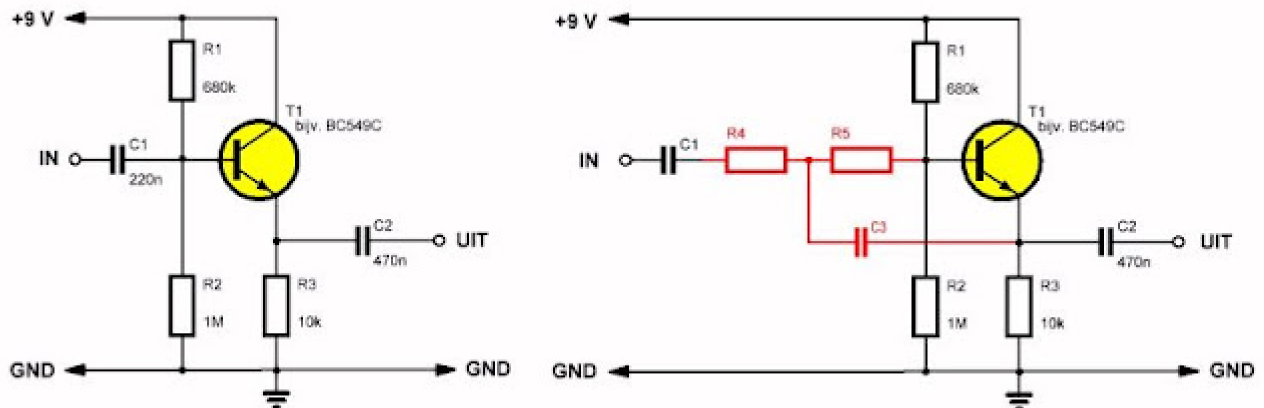
Toepassingen van bootstrapping in de elektronica
In de elektronica kunt u bootstrapping op diverse manieren toepassen:

- **Verhogen van een ingangsimpedantie**
  Dank zij bootstrapping kunt u de ingangsimpedantie van een analoge schakeling flink verhogen zonder dat u daar veel moeite voor moet doen. Deze techniek kunt u zowel bij transistoren als bij operationele versterkers toepassen.
- **Verminderen van een capacitieve belasting**
  Bootstrapping kunt u toepassen om de parasitaire capaciteit van een afgeschermde kabel te verkleinen. Via dezelfde techniek is het ook mogelijk om het effect van de Miller-capaciteit (lees verder) te reduceren.
- **Verhogen van het uitsturingsbereik**
  Door via bootstrapping een deel van het uitgangssignaal terug te koppelen naar de collector van een transistor kunt u de voedingsspanning van dit onderdeel tijdelijk verhogen tot boven de beschikbare voedingsspanning. Het gevolg is dat de uitsturing van deze halfgeleider groter kan worden dan zonder bootstrapping mogelijk is.
- **Bootstrapping van de voedingsspanning(en)**
  Met deze techniek kunt u op-amp's voeden met hogere spanningen dan normaal, waardoor u de uitgangspanningsbereik van de schakeling flink kunt vergroten.

Verhogen van een ingangsimpedantie

Bootstrapping bij de emittervolger
Een emittervolger heeft natuurlijk een vrij hoge ingangsweerstand, maar tóch is deze grootheid aan een bepaalde maximale waarde gebonden. De transistor wordt, zie onderstaande figuur links, ingesteld door middel van een weerstandsdeler R1/R2 in de basis. Deze weerstanden moeten zo hoogohmig mogelijk zijn, maar u moet er wel op letten dat de

stroom die door de weerstanden vloeit ongeveer tien keer groter is dan de basisstroom van de transistor. Deze weerstandsdeler moet u zó experimenteel bepalen dat de spanning op de emitter gelijk is aan de helft van de voedingsspanning. Het ingangssignaal wordt via de scheidingscondensator C1 aangeboden aan de basis en via de scheidingscondensator C2 afgenomen van de emitter.
Door drie extra onderdeeltjes toe te voegen, een condensator en twee weerstanden, kunt u het bootstrap principe toepassen en de ingangsimpedantie flink verhogen. Hoe dat moet is getekend in het rechter schema.

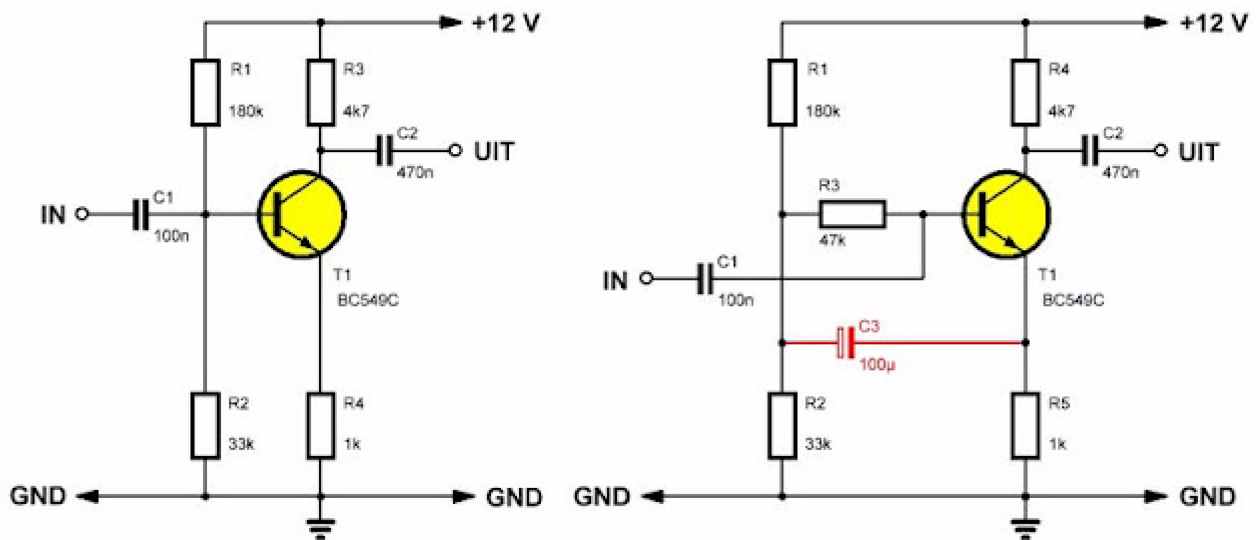


Toepassen van bootstrapping bij een emittervolger. (© 2019 Jos Verstraten)

De werking is vrij eenvoudig te verklaren. Stel dat u op de ingang een signaal met een frequentie van 1 kHz aanbiedt. Dit signaal belandt op de basis van de emittervolger en ook op de emitter. Via dit punt met een zeer lage weerstand wordt het 1 kHz signaal via de bootstrap condensator C3 teruggekoppeld naar het knooppunt tussen beide weerstanden R4 en R5. Omdat de emittervolger zo goed als één maal versterkt en zowel de emitter als C3 een zeer lage weerstand hebben voor het signaal, zal op het knooppunt van beide weerstanden een signaalspanning ontstaan die op een fractie na even groot is als de ingangsspanning. Bovendien zijn beide signalen in fase. Het gevolg is dus dat over de weerstand R4 zo goed als geen signaal staat. Beide aansluitingen staan immers op ongeveer dezelfde spanning. Als er over een weerstand nauwelijks spanning staat, dan zal er ook nauwelijks stroom doorheen vloeien. Het gevolg is dat het signaal op de ingang een zeer hoge weerstand 'ziet'.
Dank zij het bootstrap principe kunt u de schijnbare ingangsweerstand van een emittervolger opvoeren tot in het MΩ bereik.

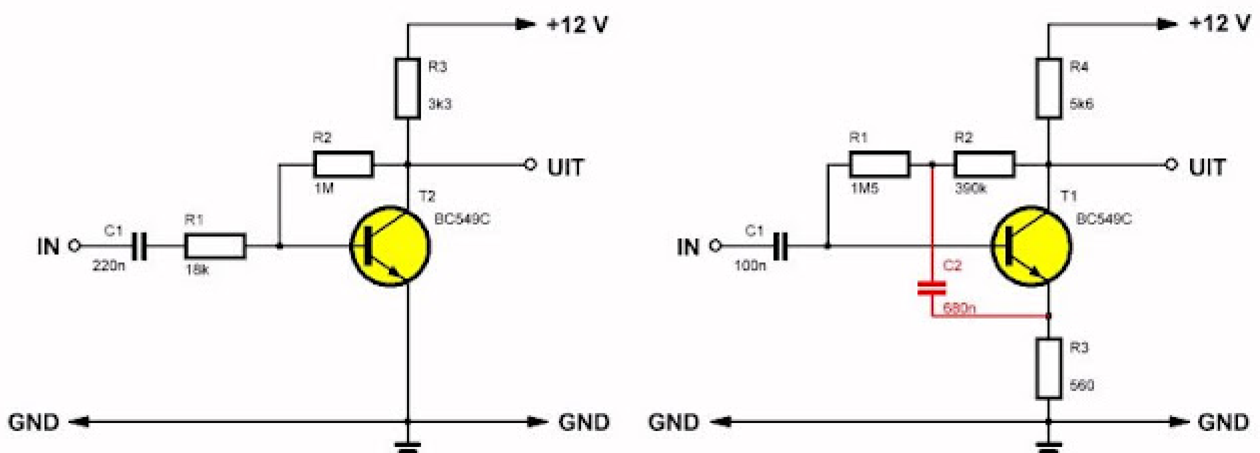
Bootstrapping bij de transistorversterker (1)
Een transistorversterker heeft een tamelijk geringe ingangsimpedantie. Deze wordt, zie het onderstaande linker schema, bepaald door de weerstanden R1 en R2 die vanuit het ingangssignaal bekeken parallel staan. Tussen de voedingsspanning en de massa staat immers een zeer grote elco $C_{voeding}$ en dit onderdeel heeft een zeer kleine impedantie voor het signaal. Het signaal 'ziet' dus dat de weerstand R1 via de impedantie van de voedingselco aan de massa ligt, dus parallel staat aan R2. De ingangsimpedantie is dus nog lager dan de waarde van R2, een weerstand die een vrij lage waarde moet hebben vanwege de juiste instelling van de basisspanning.
U kunt de ingangsimpedantie ook nu drastisch verhogen door gebruik te maken van bootstrapping. Hoe dat gaat is getekend in het rechter schema. De grote condensator C3 is de bootstrap condensator, die het signaal van de emitter in fase terugkoppelt naar de basis. Voor de te versterken wisselspanning lijkt het nu net alsof de weerstandsdeler R1/R2 veel hoogohmiger is dan voor de gelijkspanning. De spanning op het knooppunt tussen de weerstanden R1, R2 en R3 volgt nu immers de variaties van het ingangssignaal. Over de weerstand R3 valt nu nauwelijks spanning, zodat de invloed van de lage weerstand van de spanningsdeler R1/R2 wordt gecompenseerd. Het ingangssignaal 'ziet' nu dank zij de terugkoppeling via C3 een veel hogere weerstand.
Het zal duidelijk zijn dat het nu niet mogelijk is de emitter te ontkoppelen door een condensator naar de massa te schakelen. Dan kan er immers geen signaal teruggekoppeld

worden van de emitter naar de basis. Vandaar dat de wisselspanningsversterking van de schakeling klein is, met de getekende onderdelenwaarden wordt een versterking van ongeveer 4,2 bereikt. Door het bootstrap effect heeft de schakeling echter een ingangsimpedantie van ongeveer 500 kΩ, hetgeen voor de meeste toepassingen meer dan voldoende is.

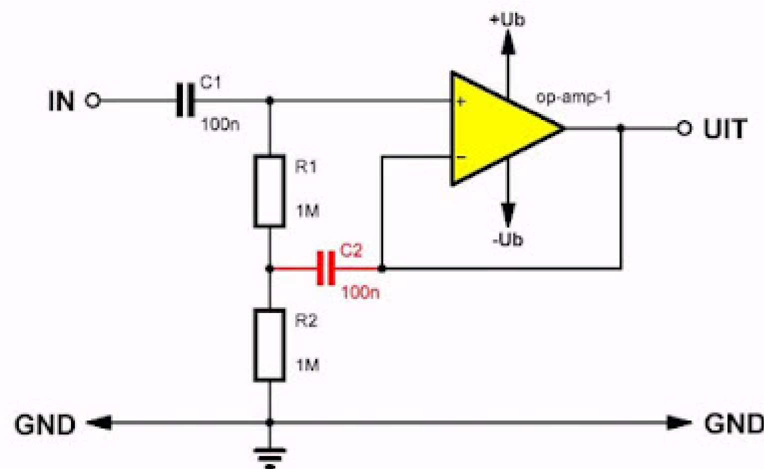


Het bootstrappen van een transistorversterker (1). (© 2019 Jos Verstraten)

Bootstrapping bij de transistorversterker (2)
Het schema van de vorige figuur is het standaard schema van een transistorversterker. Toch treft u soms een alternatieve manier aan om de instelling en de versterking van een transistorversterker te stabiliseren. In het linker schema van onderstaande figuur wordt de emitter weer rechtstreeks met de massa verbonden. De instelling van de basis wordt nu niet uit de voeding verzorgd, maar vanuit de collector. Door deze rechtstreekse terugkoppeling via R2 van de uitgang naar de ingang ontstaat een stabiliserend effect. Stel dat de transistor onder invloed van een stijgende temperatuur meer wil gaan geleiden. De collectorstroom stijgt, de spanning op de collector daalt. Het gevolg is nu dat er via R2 minder stroom naar de basis zal vloeien, zodat de stroomstijging wordt tegengewerkt. Het zal duidelijk zijn dat de terugkoppelweerstand R2 ook zorgt voor een reductie van de signaalversterking. De wisselspanningsversterking wordt bepaald door de verhouding tussen R2 en R1, zodat in het getekend voorbeeld u een signaalversterking van ongeveer 50 kunt verwachten.
De zeer lage ingangsimpedantie van deze schakeling kunt u weer compenseren door het bootstrap principe toe te passen (rechts). Omdat bij het bootstrap principe steeds in fase moet worden teruggekoppeld, moet er een weerstand in de emitter worden opgenomen.
Het praktisch voorbeeld in de onderstaande figuur geeft een transistorversterker met goede stabilisatie, een ingangsimpedantie van ongeveer 500 kΩ en een signaalversterking van ongeveer 10.



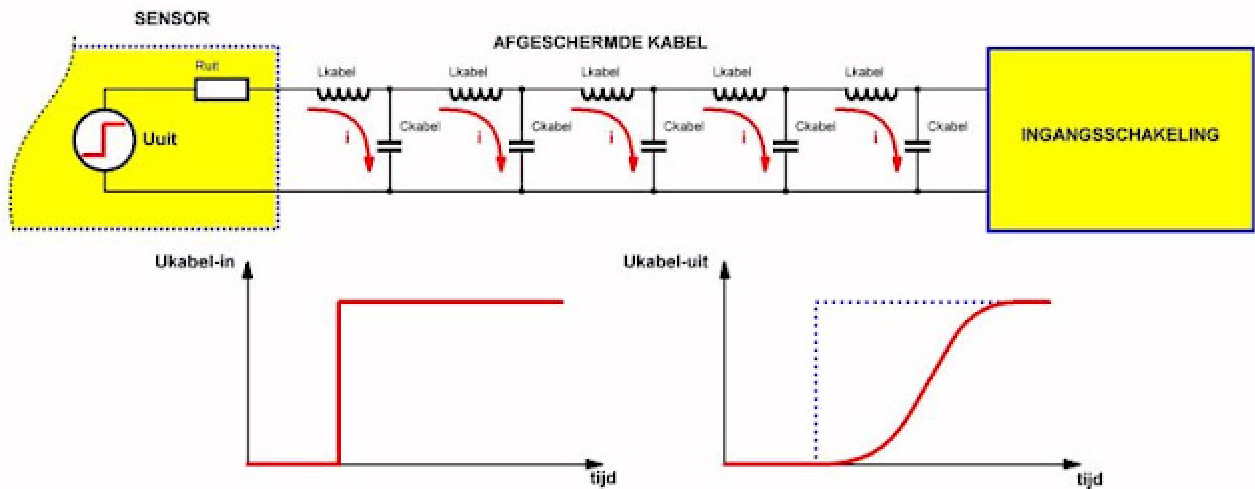
Bootstrapping bij een op-amp
Waarom zou u een op-amp schakeling bootstrappen? Op-amp's hebben immers al een zeer hoge ingangsimpedantie en het lijkt absoluut overbodig deze nog eens te verhogen dor middel van bootstrapping. Maar soms is het van belang een onderscheid te maken tussen de ingangsweerstand voor gelijkspanning en de ingangsimpedantie voor wisselspanning. Wilt u een ingangsschakeling met een vrij lage weerstand naar de massa maar met een zeer hoge signaalimpedantie, dan kunt u het onderstaande schema toepassen. Dit kan van belang zijn om offsetspanningen te reduceren. De positieve ingang van de op-amp 'ziet' een gelijkstroomweerstand van slechts 2 MΩ naar massa (R1 + R2). Het ingangssignaal 'ziet' echter een veel hogere ingangsimpedantie vanwege de bootstrapping terugkoppeling van de uitgang via C2. Over R1 valt nauwelijks signaalspanning, dus de ingangsimpedantie is extreem hoog.



Het bootstrappen van een op-amp als buffer geschakeld. (© 2019 Jos Verstraten)

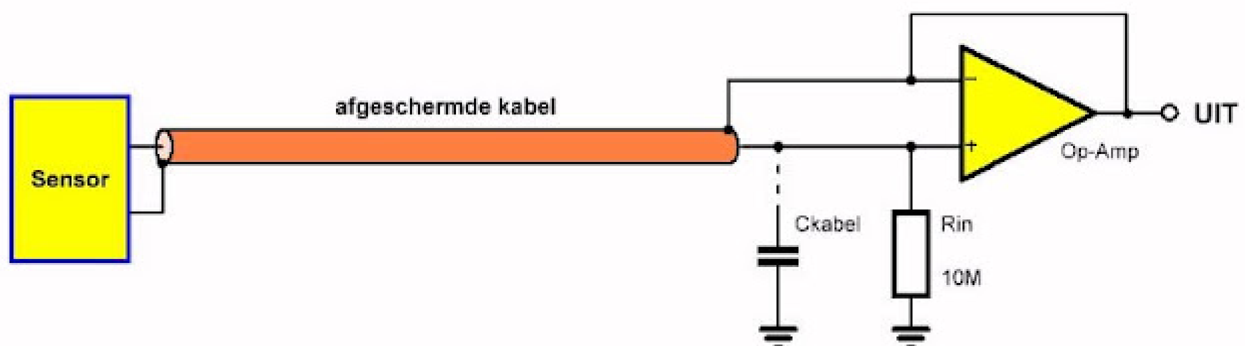
Verminderen van een capacitieve belasting

Bootstrapping van een afgeschermde kabel
U verbindt hoogimpedante sensoren of sensoren die heel weinig signaal afgeven, bijvoorbeeld een microfoon, met een afgeschermde kabel met uw schakeling. Zo'n kabel is echter niet wat het lijkt, een draadje koper met op een bepaalde afstand een afschermingskous er om heen. Volgens de theoretische elektriciteitsleer kunt u een afgeschermde kabel voorstellen als een serieschakeling van een groot aantal LC-netwerkjes, zoals voorgesteld in onderstaande figuur. Een afgeschermde kabel vormt dus een capacitieve belasting voor uw sensor. Als deze sensor steile pulsen levert, dan komt u in de problemen. De sensor moet namelijk op het moment dat de uitgangsspanning omschakelt van 'L' naar 'H' voldoende stroom en vermogen kunnen leveren om al die kleine kabelcapaciteitjes zo snel mogelijk op te laden. Als dat niet het geval is zal er van uw mooie puls aan het begin van de afgeschermde kabel niet veel overblijven. De puls verschijnt niet alleen vertraagd op de uitgang van de kabel, maar bovendien is van de steile voorflank niet veel over.



Waarom bootstrappen van een afgeschermde kabel soms noodzakelijk is. (© 2019 Jos Verstraten)

Ook hier kunt u het bootstrap principe inschakelen om uw probleem op te lossen. Al eerste trap in uw schakeling gebruikt u een als buffer geschakelde op-amp, zie onderstaande figuur. De uitgang van deze spanningsvolger wordt niet alleen verbonden met de inverterende ingang van de operationele versterker, maar ook met de afscherming van de kabel. Dat is in feite niets anders dan het toepassen van bootstrapping op de kabel. Tussen de afgeschermde ader van de kabel en de afscherming staat nu immers geen spanningsverschil, met als gevolg dat de parasitaire capaciteit van de kabel geen invloed op het signaal heeft. Op deze manier is het mogelijk een hoogimpedante microfoon zonder buffering bij de microfoon via een tien meter lange kabel met een versterker te verbinden, zonder dat de hoge frequenties door de capaciteit van de kabel worden verzwakt.

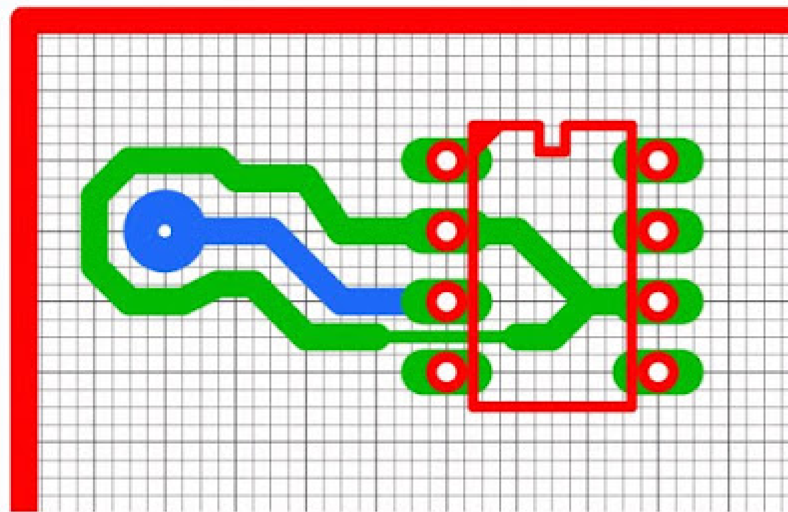


Toepassen van bootstrapping op een afgeschermde kabel. (© 2019 Jos Verstraten)

Bootstrapping op een print

Een print is alleen schijnbaar een perfecte isolator. Het basismateriaal heeft een bepaalde oppervlakteweerstand, die in de loop der jaren steeds lager wordt. Dat verschijnsel heeft te maken met de niet te vermijden vervuiling van de print. Als u dus twee printsporen naast elkaar legt dan bestaat de kans dat er via de oppervlakteweerstand van de print signaallekken ontstaan van het ene naar het andere printspoortje. De oppervlakteweerstand van uw print kan heel erg vervelend worden als u zeer hoogimpedante schakelingen op de print wilt aansluiten. Ook hier kunt u bootstrapping toepassen om dit probleem op te lossen. Als u de onderstaande print layout bekijkt zal duidelijk zijn dat de hoogimpedante lijn gevormd wordt door het blauwe printspoor tussen de ingang en de niet-inverterende ingang (pen 3) van de op-amp. De op-amp is als spanningsbuffer geschakeld, de uitgangsspanning is dus gelijk aan de ingangsspanning. Die uitgangsspanning heeft echter een zeer lage inwendige impedantie. Wat u nu moet doen is het gevoelige blauwe spoor volledig omcirkelen met een ring en deze ring aansluiten op de uitgang van de op-amp. Dit is voorgesteld door de groene printsporen. Deze ring staat op dezelfde spanning als de blauwe lijn. Omdat er tussen de groene en blauwe sporen geen spanningsverschil staat, kan er ook geen stroom vloeien.

Kortom, de oppervlakteweerstand van de print in deze ring heeft geen enkele invloed: tussen twee punten waar geen spanningsverschil tussen heerst kan immers géén stroom vloeien!



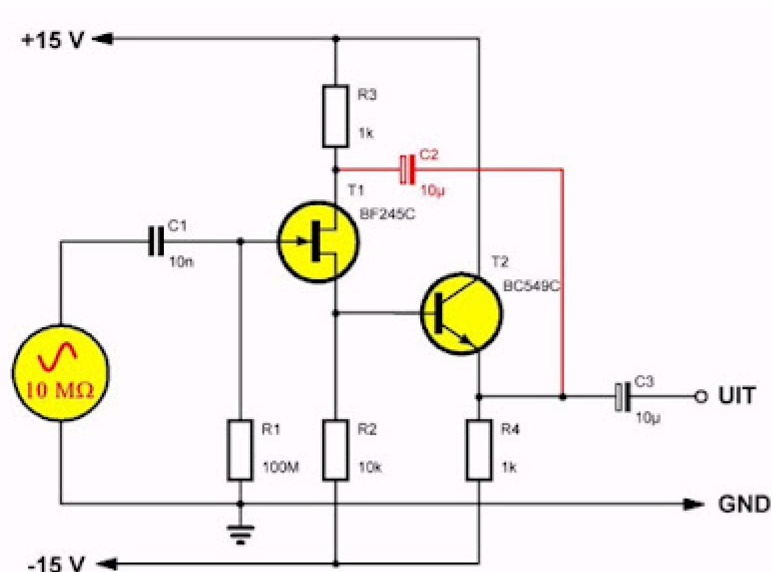
Toepassen van bootstrapping op de ingang van een print. (© 2019 Jos Verstraten)

Verlagen van de invloed van de Miller-capaciteit
De Miller-capaciteit is de parasitaire capaciteit die aanwezig is tussen de uitgang en de ingang van een actief element zoals een buis, een bipolaire transistor of een FET. Deze capaciteit is de voornaamste oorzaak van de verlaging van de versterkingsfactor bij hoge frequenties. De impedantie van deze capaciteit zorgt immers voor een tegenkoppeling die sterker wordt naarmate de frequentie van het signaal stijgt. De Miller-capaciteit werd in 1920 beschreven door de Amerikaanse ingenieur John Milton Miller bij zijn onderzoek van de triode.
De Miller-capaciteit staat:

- Bij een buis tussen de roosters en de anode.
- Bij een bipolaire transistor tussen de basis en de collector.
- Bij een FET tussen de gate en de drain.

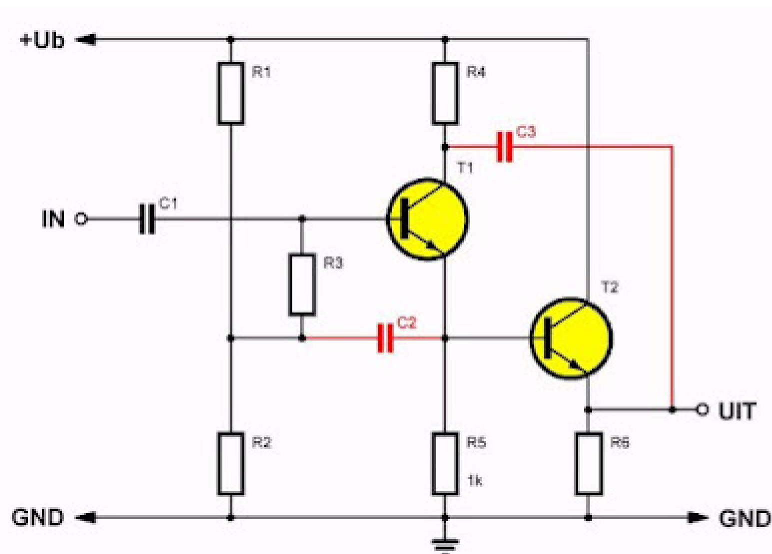
Een voor de hand liggende methode om de invloed van deze parasitaire capaciteit te reduceren is het spanningsverschil tussen de uitgang en de ingang van het actieve element te verlagen. Hoe kleiner dit spanningsverschil, hoe minder deze capaciteit zich kan opladen en hoe kleiner de parasitaire stromen die kunnen vloeien.

Miller-compensatie bij een FET
In het onderstaand schema is een mooi voorbeeld van deze techniek voorgesteld. U moet het uitgangssignaal van een signaalbron met een inwendige impedantie van niet minder dan 10 MΩ versterken en dat met een zo groot mogelijke bandbreedte. Het gebruik van een FET ligt voor de hand, maar deze onderdelen hebben een Miller-capaciteit tussen de gate en de drain die het gedrag op hoogfrequent gebied nogal negatief beïnvloedt. Door achter de FET-trap een emittervolger te schakelen en de uitgang van deze schakeling capacitief terug te koppelen naar de drain van de FET vergroot u de bandbreedte van deze schakeling aanzienlijk. Dank zij deze bootstrapping wordt het signaalverschil tussen gate en drain kleiner, waardoor de invloed van de Miller-capaciteit wordt gereduceerd. Gestuurd uit een bron met een inwendige weerstand van 10 MΩ is de bandbreedte van deze schakeling zonder bootstrapping slechts 22 kHz. Mét bootstrapping wordt deze eigenschap vergroot tot niet minder dan 215 kHz.



Bootstrapping vergroot de bandbreedte van deze hoogohmige FET-schakeling. (© 2019 Jos Verstraten)

Dubbele bootstrapping bij een emittervolger
In de onderstaande figuur wordt gebruik gemaakt van de twee besproken bootstrap principes om de eigenschappen van een emittervolger te verbeteren. Dat betreft zowel de ingangsimpedantie als de bandbreedte. Als u dit artikel tot nu toe hebt gevolgd, zult u zonder enige moeite de functie van de condensatoren C2 en C3 kunnen begrijpen. De kleine weerstand R4 is noodzakelijk om de spanning die wordt teruggekoppeld via C3 niet onmiddellijk te laten afvloeien via de lage impedantie van de voedingsspanning $+U_b$.



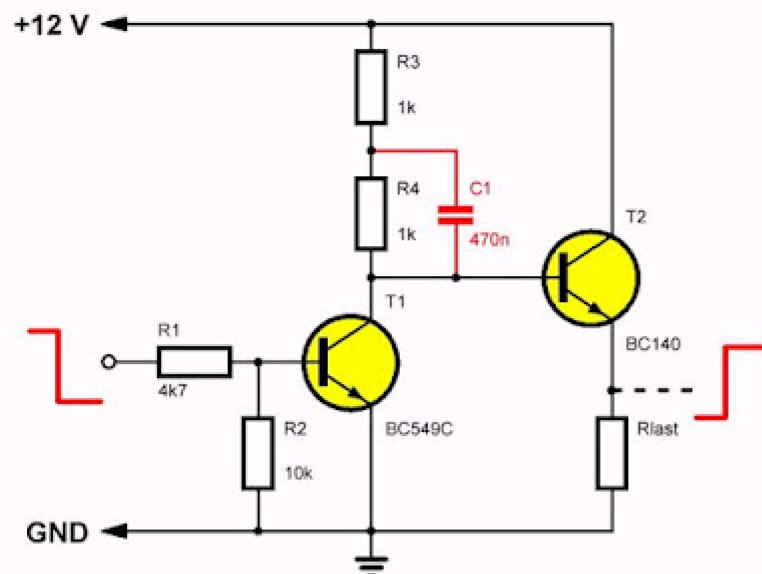
Dubbele bootstrapping bij een emittervolger. (© 2019 Jos Verstraten)

Verhogen van het uitsturingsbereik

Het principe van deze bootstrapping
Er zijn nogal wat resistieve belastingen die bij het inschakelen een grote piekstroom vragen. U kunt daarbij denken aan gloeilampen, verwarmingselementen en zelfs relais. Dank zij bootstrapping kunt u een schakeling zó aanpassen dat de leverbare stroom bij inschakelen groot genoeg is.
Het principe is steeds identiek. Een deel van het uitgangssignaal wordt capacitief teruggekoppeld naar de voedingsvoorziening van de eindtrap. Daardoor wordt deze eindtrap even gevoed uit een hogere spanning dan de beschikbare voedingsspanning, waardoor u de

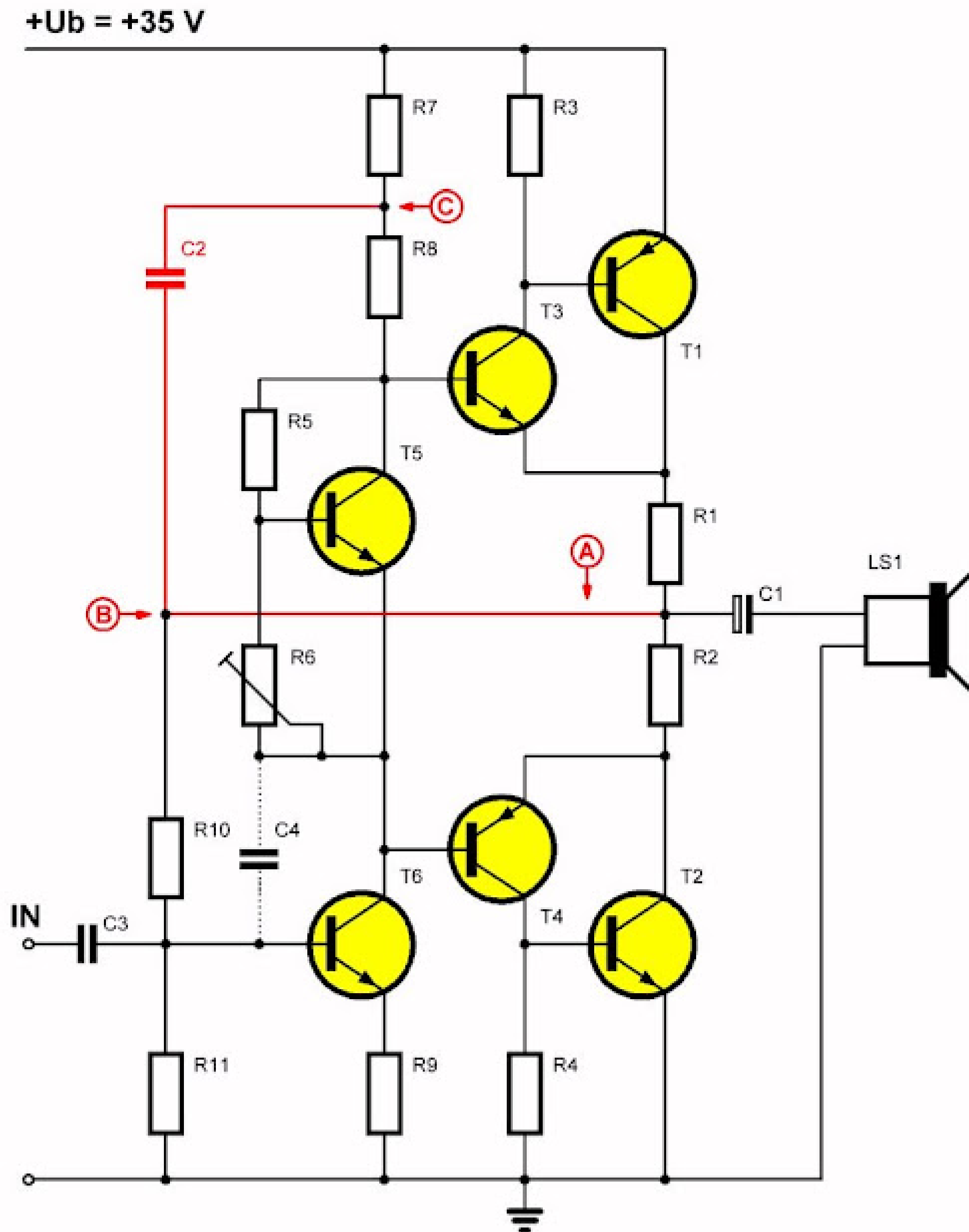
topwaarde van de stuurstroom naar de eindtrap kunt vergroten.

Vergroting van de uitsturing van een emittervolger
In het onderstaande schema is een schakeling getekend een een flinke inschakelstroom kan leveren aan de belasting R_{last}. De schakeling werkt inverterend. Als de ingang 'L' is wordt de belasting gestuurd. Als u de ingang 'H' maakt wordt de belasting stroomloos. Ga van deze laatste situatie uit. Transistor T1 geleidt, zijn collectorspanning is 'L'. Transistor T2 wordt niet gestuurd en spert. Over de belasting R_{last} valt geen spanning. Over de weerstand R4 valt de helft van de voedingsspanning. De 12 V wordt immers verdeeld over de twee even grote weerstanden R3 en R4. Het gevolg is dat de condensator C1 oplaadt tot deze spanning. Stel nu dat u de schakeling wilt bekrachtigen en de ingang naar de massa trekt. Transistor T1 gaat sperren en zijn collectorspanning gaat opeens stijgen. De condensator C1 koppelt deze spanningsstijging door naar het knooppunt van R3 en R4. Dank zij de 6 V die over deze condensator stond gaat dit knooppunt nu eventjes naar een spanning die aanmerkelijk hoger is dan de spanning die er zonder deze condensator op zou staan. Deze extra spanningspiek zorgt voor een extra stuurstroom in de basis van T2. Deze halfgeleider wordt nu even helemaal in verzadiging gestuurd en R_{last} wordt maximaal van stroom voorzien. Uiteraard ontlaadt de condensator C1 zich vrij snel en de basisstroom van T2 gaat dalen.



Het verhogen van de inschakelstroom bij een emittervolger. (© 2019 Jos Verstraten)

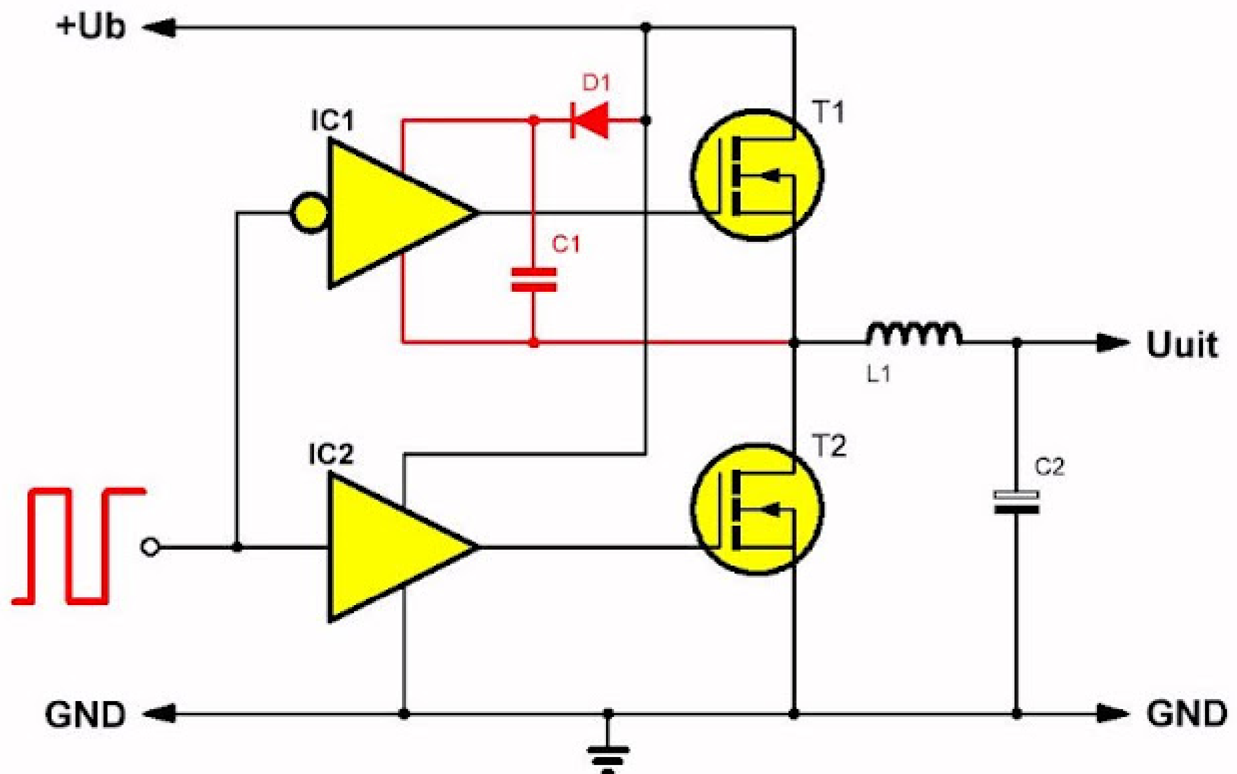
Bootstrapping bij een audio eindversterker
Het beschreven principe wordt bij vrijwel iedere audio eindversterker toegepast voor het vergroten van de uitsturing van de eindtransistoren. In het onderstaande schema is de standaard schakeling van een in klasse AB ingestelde eindversterker voorgesteld mét bootstrapping.
Condensator C2 in dit schema de bootstrap condensator. Stel dat de versterker maximaal positief wordt uitgestuurd. De spanning op punt A zal dan zeer dicht bij de voedingsspanning liggen. Het zal duidelijk zijn dat de spanningsreserve over R7 en R8 in deze situatie zeer klein is. Gevolg is dat transistor T3 niet volledig uitgestuurd kan worden, waardoor de versterker gaat begrenzen. Door condensator C2 wordt de spanning op punt C evenwel groter dan de voedingsspanning, zodat er genoeg spanning over R8 ontstaat om de transistoren uit te sturen.
Momenteel is $U_C = U_A + U_{C2}$. De spanning over de condensator wordt dus opgeteld bij de spanning op punt A, zodat punt C inderdaad tijdelijk op een spanning komt te staan die hoger is dan de voedingsspanning. Als u voor C2 een grote elco kiest, zal de volledige uitsturing van de bovenste helft van de eindtrap eveneens voor lage frequenties verzekerd blijven.



Bootstrapping bij een audio eindversterker. (© 2019 Jos Verstraten)

Bootstrapping bij een MOSFET eindtrap
Voor het aansturen van grote vermogens of DC/DC-converters worden tegenwoordig meestal pulsgestuurde brug of halve-brug schakelingen gebruikt met MOSFET's. In de meeste gevallen bestaat zo'n brug of halve-brug uit vier of twee N-kanaal MOSFET's omdat die het goedkoopst zijn. In de onderstaande figuur is een dergelijke schakeling getekend. De twee MOSFET's moeten afwisselend in sper en in geleiding worden gestuurd. Daarvoor dienen de twee gate-drivers IC1 en IC2. Let op het inverterend teken aan de ingang van IC1!
N-kanaal MOSFET's krijgen de gewenste zeer lage inwendige weerstand als de spanning op de gate 6 V tot 10 V positiever is dan de spanning op de source. Bij de onderste MOSFET is dat geen probleem, de gate-driver IC2 kan immers uitgestuurd worden tot tegen de voedingsspanning $+U_b$ en levert dan meer dan voldoende spanning voor het uitsturen van T2.
Voor het in geleiding sturen van de bovenste MOSFET heeft de schakeling, zonder bootstrapping, echter niet voldoende spanningsreserve. Dank zij de bootstrap-onderdelen C1 en D1 kunt u de voedingsspanning van de bovenste gate-driver echter verhogen tot boven de voedingsspanning, namelijk tot ongeveer de dubbele waarde van $+U_b$. IC1 ligt niet aan de massa, maar aan het knooppunt van beide MOSFET's. Deze driver wordt dus niet gevoed tussen GND en $+U_b$, maar tussen $+U_b$ en $+[2 \bullet U_b]$ en is in staat voldoende spanning te leveren om de bovenste MOSFET in geleiding te sturen.
Omdat de condensator C1 slechts een eindige hoeveelheid lading bevat moet u het laadproces periodiek herhalen. De schakeling werkt dus alleen als u aan de ingang een

pulstrein legt. De condensator C1 wordt in de eerste halve periode van de pulsen opgeladen en in de tweede halve periode weer ontladen door de voedingsstroom van IC1.



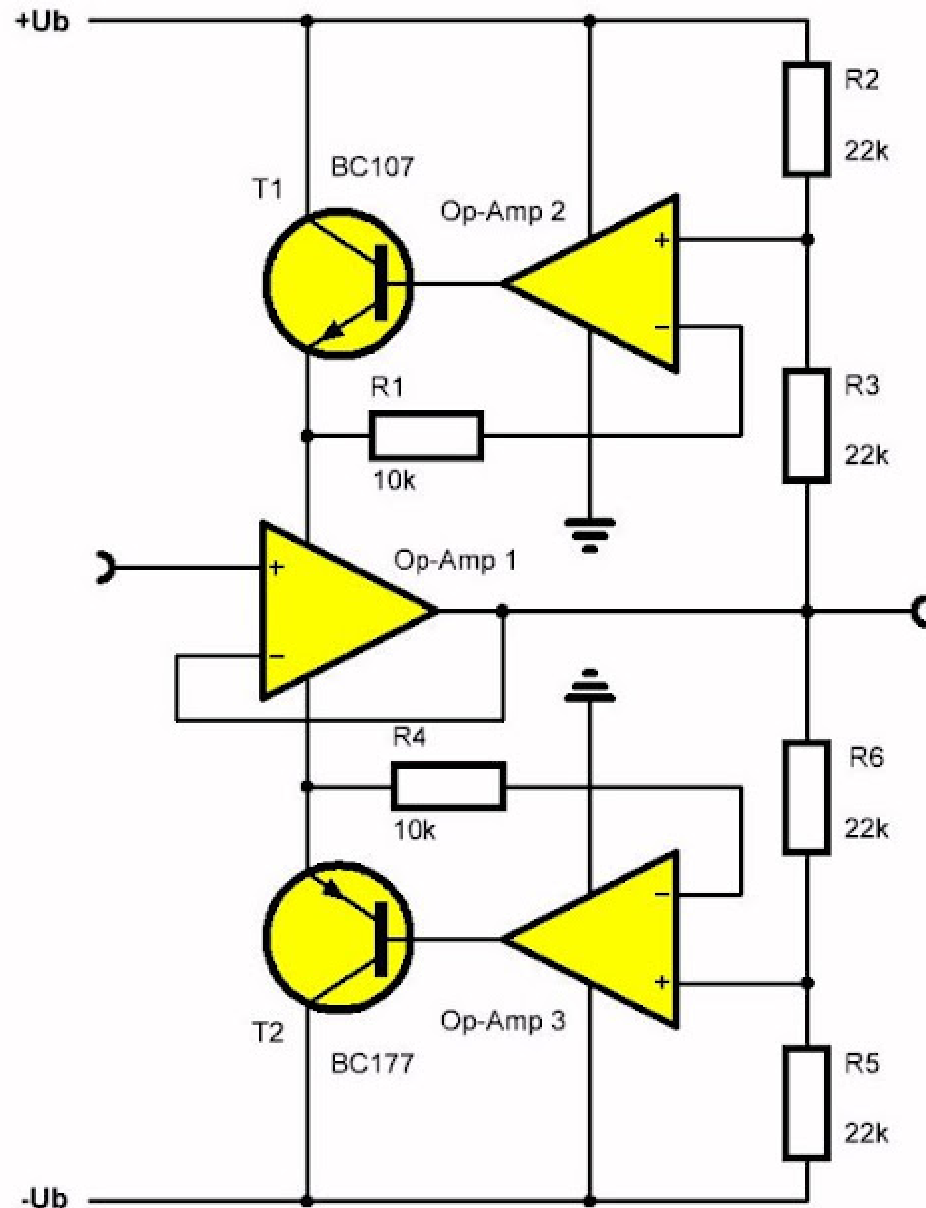
Het bootstrappen van een MOSFET halve-brug schakeling. (© 2019 Jos Verstraten)

Bootstrapping van de voedingsspanning(en)

Beperking van goedkope op-amp's
U kunt de meeste populaire operationele versterkers voeden uit een maximale spanning van 36 V. Werkt u symmetrisch, dan betekent dit dat de schakeling uit maximaal ±18 V gevoed mag worden. Dat heeft tot gevolg dat de schakeling geen signalen kan verwerken of genereren die een grotere top-tot-top waarde hebben dan ongeveer 30 V. Wilt u grote signalen met een op-amp verwerken, dan moet u een beroep doen op nogal prijzige speciale op-amp's.

Bootstrapping biedt een oplossing
Er bestaat een zeer ingenieus systeem om het uitsturingsbereik van een operationele versterker groter te maken dan zijn maximale voedingsspanningen. Dit systeem noemt men *'bootstrapping van de voeding'*. Het principe is getekend in onderstaande figuur. Op-Amp 1 wordt gebruikt als spanningsvolger voor grote signalen. De voedingsaansluitingen gaan niet rechtstreeks naar $+U_b$ en $-U_b$, maar via transistoren. Deze transistoren worden gestuurd uit twee hulp op-amp's. Op-Amp 2 wordt gevoed tussen $+U_b$ en de massa, Op-Amp 3 tussen de massa en $-U_b$. De voedingsspanningen kunnen nu verhoogd worden tot ±36 V. Voor de twee hulp op-amp's geldt dat deze dan ieder 36 V voedingsspanning te verwerken krijgen, hetgeen toelaatbaar is.
Maar hoe zit dat met Op-Amp 1? Stel dat u aan de spanningsvolger een spanning van 0 V aanlegt. De uitgang zal dan ook op 0 V staan. De niet-inverterende ingang van de bovenste hulp op-amp is via een spanningsdeler R2/R3 ingesteld op de helft van de positieve voedingsspanning. De schakeling zal zichzelf nu zo inregelen dat dezelfde spanning op de inverterende ingang staat. Dat kan alleen als de positieve voedingsspanning van de Op-Amp 1 op de helft van de positieve voedingsspanning staat, dus op +18 V. Deze spanning wordt immers rechtstreeks teruggekoppeld naar de inverterende ingang van de bovenste hulp op-

amp. Hetzelfde verhaal geldt voor de negatieve voedingsaansluiting van Op-Amp 1. Deze staat op een spanning van -18 V.



Het bootstrappen van de voedingsspanningen van een op-amp. (© 2019 Jos Verstraten)

De situatie verandert dramatisch als u op de ingang van de schakeling een signaal zet. Stel dat u +5 V op de ingang zet. De uitgang zal ook naar +5 V gaan. De spanningsdelers naar de ingangen van de twee hulp op-amp's worden nu anders ingesteld. De bovenste staat nu tussen +36 V en +5 V, zodat er over de deler maar 31 V staat. Over iedere weerstand valt 15,5 V, het gevolg is dat de niet-inverterende ingang nu wordt ingesteld op +20,5 V. Het regelsysteem zorgt ervoor dat dit ook de spanning wordt op de positieve voedingsaansluiting van Op-Amp 1. Bij de onderste spanningsdeler staat er nu 41 V over de weerstanden. Over iedere weerstand valt 20,5 V, zodat de niet-inverterende ingang van de onderste hulp op-amp op een spanning van -15,5 V komt te staan.
Door het onderste regelmechanisme wordt dat ook de spanning op de negatieve voedingsaansluiting van Op-Amp 1. Deze op-amp wordt nu niet gevoed tussen +18 V en -18 V, maar tussen +20,5 V en -15,5 V. Hoewel de totale voedingsspanning nog steeds 36 V bedraagt heeft het voedingsbereik zich positief verschoven.
De voedingsspanning verplaatst zich dus in de richting van de grootte en de polariteit van het ingangssignaal. Op deze manier kunt u Op-Amp 1 veel verder uitsturen, omdat in het ultieme positieve geval Op-Amp 1 gevoed wordt tussen +36 V en 0 V en in het ultieme negatieve geval tussen 0 V en -36 V.